

UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Elektronik I - inoffizielles Skript
SS2012

Autoren:
Christian Höne
uni@christianhoene.de

Dozent:
Christoph Kalkuhl

Tübingen, den 30.7.2012

1 Vorwort

Inoffizielle Mitschrift zur Vorlesung Elektronik I im SS2012. Ergänzungen, Fehler und Korrekturen bitte an uni@christianhoene.de schicken. Falls nicht anders angegeben sind die Bilder eigene Produktionen. Lizenz: CC-BY-SA "Christian Höne"

<http://www.christianhoene.de/uni/ElektronikI/>

1.1 Literatur

Albrecht Rost: Grundlagen der Elektrotechnik (Lehrbuch)

Tietze/Schenk: Halbleiter Schaltungstechnik (Schaltungsentwurf)

Patrick Schnabel: Elektronik Fibel (zu einfach)

2 Einführung, Wiederholung

U Spannung [V] Volt

I Strom [A] Ampere

P Leistung [W],[VA] Watt

Q Ladung [C],[As] Coulomb

f Frequenz [Hz],[$\frac{1}{s}$] Hertz

R Widerstand [Ω],[$\frac{V}{A}$] Ohm

C Kapazität [F],[$\frac{As}{V}$] Farad

L Induktivität [H],[$\frac{Vs}{A}$] Henry

3 Haustechnik und Sicherheit

3.1 Stromunfall

Physiologische Wirkungen bei einem Stromunfall

1. Verbrennungen
2. Gewebeschäden
3. Verkrampfungen
4. Herzkammerflimmern

Auch wenn nach einem Stromunfall nicht unmittelbar Schäden auftreten trotzdem Arzt aufsuchen, da Herzkammerflimmern auch noch später einsetzen kann.

3.2 Schutz vor Stromunfällen

Berührungsschutz

1. Isolation (z.B. der Kabel)
2. Gehäuse
3. Abspannung
4. Abstand

Praktikum Termin 1: Haustechnik, Sicherung
Leitungs- und Personenschutz (LS- und FI-Schalter); Drehstrom (Spannungen)

3.3 Netzstromversorgung

Drehstromnetz: drei spannungsführende Leiter (Phasen) und Nullleiter

Spannung zwischen Phase und Nulleiter: 230V ($L_{1,2,3} - N$)

Spannung zwischen zwei Phasen: 400V

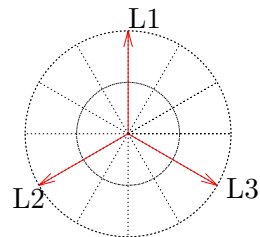


Abbildung 1: Zeigerdiagramm, Phasenverschiebung je 120°, [gnuplot]

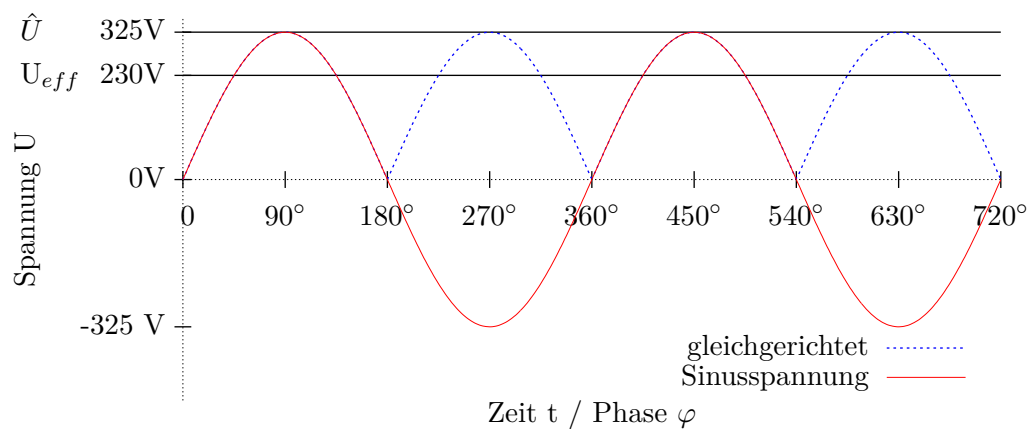


Abbildung 2: Effektivwert, [gnuplot]

Spannungsscheitelwert \hat{U} entspricht dem $\sqrt{2}$ -fachen des Effektivwertes U_{eff} :

$$\hat{U} = \sqrt{2} \cdot U_{eff} \iff U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Das Drehstromnetz ist sinnvoll, da nur ein Rückleiter gebraucht wird, im Idealfall sogar gespart werden kann. Die 3 Phasen sind minimal um eine Rotation bei einem Motor ohne Umpolmechanismen zu erzeugen.

Steckdose für den deutschen Hausgebrauch:

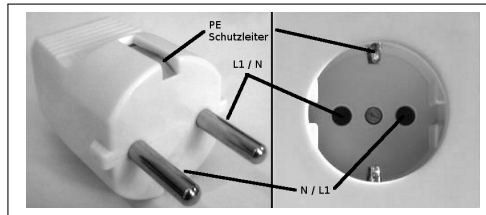


Abbildung 3: Schuko, Schutzkontaktsteckdose (Stecker-Typ F oder CEE 7/4)
Quelle: Wikipedia

L Spannungsführender Leiter (Englisch: Live conductor)

N Neutral- oder Nullleiter

PE Schutzleiter

Drehstromstecker:

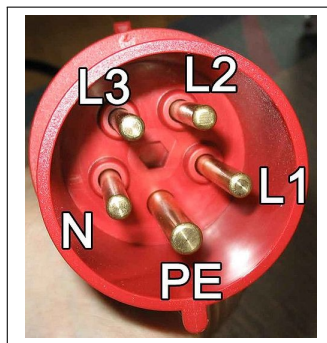


Abbildung 4: (CEE-)Drehstromstecker
Quelle: Wikipedia (Stephan N aus der deutschsprachigen Wikipedia)

CEE meist in Ausführung mit 16A, 32A oder 63A Belastbarkeit.

3.4 Sicherheit

Leitungsschutzschalter (LS-Schalter)



Abbildung 5: Leitungsschutzschalter, Quelle: Wikipedia (Ali@gwc.org.uk)

2: Freiauslösung, 3: Schaltkontakt, 5: Bimetallstreifen (thermische Überlast), 7: Elektromagnetische Auslösung, 8: Deionkammer zur Lichtbogenlöschung

Schaltet über dem Bemessungsstrom ab (siehe Auslösekennlinie). Schützt alles was dahinter kommt.

Fehlerstromschutzschalter (FI-Schalter)

Schema:

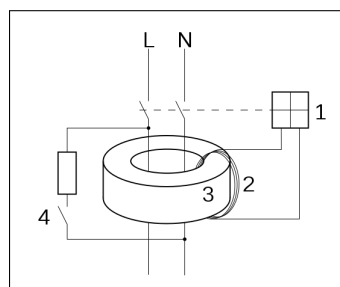


Abbildung 6: FI-Schalter, Quelle: Wikipedia (de:User:Elchriso, Markus Matern)

1: Schaltschloss, 2: Auslösespule, 3: Summenstromwandler, 4: Prüftaste

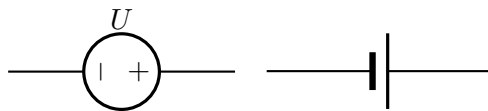
Bei Stromdifferenz (\vec{B} -Felder heben sich nicht auf) schaltet FI ab.

Vorteil: großer Nennstrom: 40A, kleiner Differenzstrom 30mA, schaltet schnell ab 30ms

4 Spannung, Strom, Widerstand

4.1 Spannungsquelle

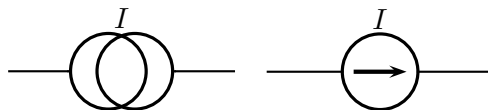
Symbol:



Spannung konstant, unabhängig vom Strom

4.2 Stromquelle

Symbol:



Strom konstant, unabhängig von der Spannung.

4.3 Widerstand

Symbol:

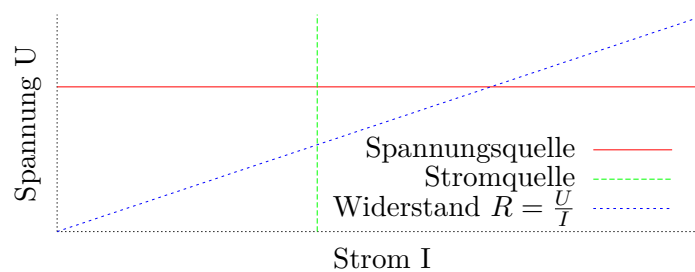
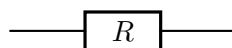
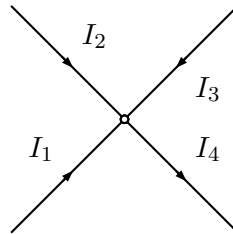


Abbildung 7: U-I-Kennlinien, [gnuplot]

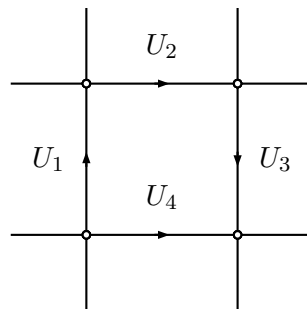
4.4 Kirchhoffsche Regeln

1. Knotenregel Die Summe aller Ströme ist Null ($\sum_n I_n = 0$).



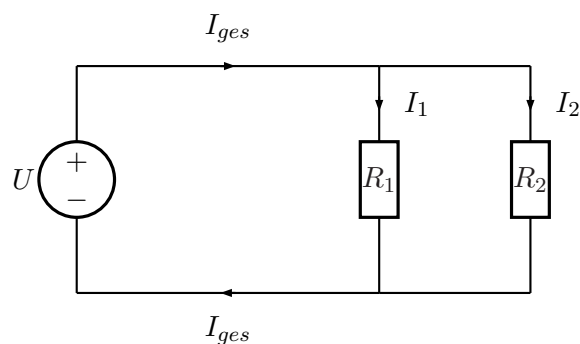
Hier: $I_1 + I_2 + I_3 = -I_4$

2. Maschenregel Die Summe aller Spannungen ist Null ($\sum_n U_n = 0$).



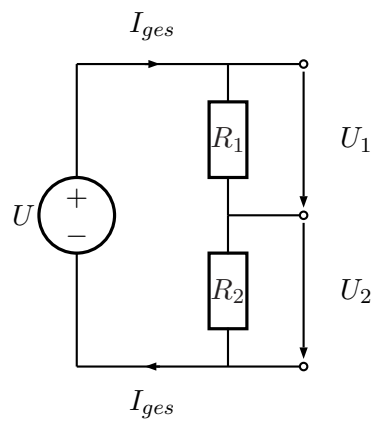
Hier: $U_1 + U_2 + U_3 = -U_4$

4.5 Parallelschaltung von Widerständen



$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 - I_{ges} &= 0 \\
 I_1 &= \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, I_{ges} = \frac{U}{R_{ges}} \\
 \frac{1}{R_{ges}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{ges} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}
 \end{aligned} \tag{2}$$

4.6 Reihenschaltung von Widerständen



$$-U = R_1 \cdot I_{ges} + R_2 \cdot I_{ges} = R_{ges} \cdot I_{ges} \Rightarrow R_{ges} = R_1 + R_2 \tag{3}$$

Spannungsteiler:

$$U_2 = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} U \tag{4}$$

Praktikum Termin 2: Geräteeinführung

Netzgerät, Spannungsquelle, Spannungsteiler, Oszilloskop, Funktionsgenerator

5 Vereinfachende Techniken

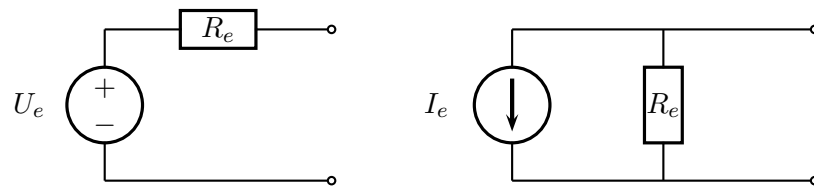


Abbildung 8: Ersatzspannungsquelle und Ersatzstromquelle

Überlagerungssatz - geht bei linearen Netzwerken

Netzwerk:

Auswirkung von Spannungs- und Stromquellen - einzeln, während die anderen nicht aktiv sind:

- nicht aktive Spannungsquellen \rightarrow Kurzschluss
- nicht aktive Stromquellen \rightarrow Leerlauf

Bsp:

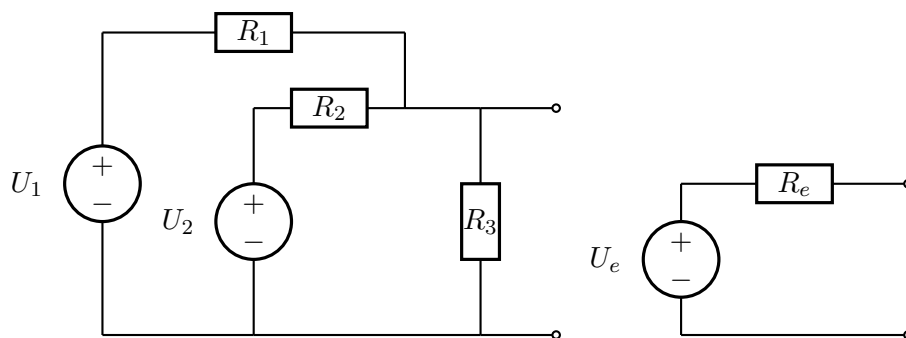


Abbildung 9: Netzwerk und seine Ersatzschaltung

$$R_e = R_1 || R_2 || R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad (5)$$

$$U_e = \left[U_1 \cdot \frac{R_2 || R_3}{R_1 + (R_2 || R_3)} \right] + \left[U_2 \cdot \frac{R_1 || R_3}{R_2 + (R_1 || R_3)} \right] \quad (6)$$

6 Wechselspannung/Wechselstrom

$$\omega = 2\pi f \tag{7}$$

j statt i für imaginäre Einheit

$$U(t) = \hat{U} \cdot \cos(\omega t + \varphi_u) \tag{8}$$

$$I(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) \tag{9}$$

gewählt $\varphi_u = 0$. φ : Winkel zwischen I und U ($\varphi = \varphi_u - \varphi_i$)

$\varphi > 0$ Strom läuft Spannung nach

$\varphi < 0$ Strom eilt Spannung voraus

$$U(t) = \hat{U} \cdot \cos(\omega t) \tag{10}$$

$$I(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega t - \varphi) \tag{11}$$

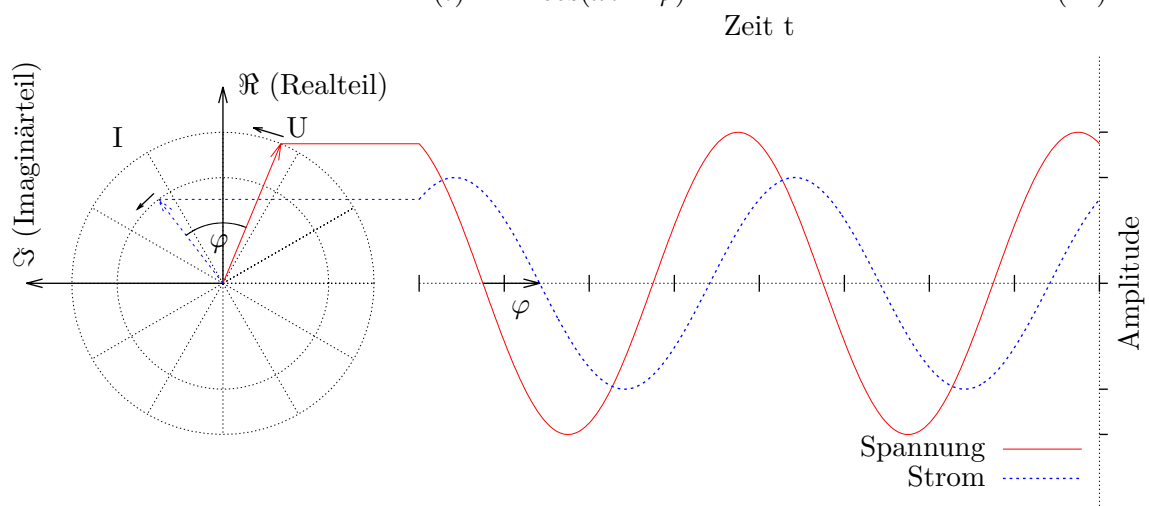


Abbildung 10: Zeigerdiagramm, komplexe Ebene um 90° gedreht, Zeitbereich (Projektion auf die Re-Achse), [gnuplot]

$$\underline{U}e^{j\omega t} = \hat{U}e^{j(\omega t + \varphi_u)} \tag{12}$$

$$= \hat{U} [\cos(\omega t + \varphi_u) + j \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)] = \underline{U} [\cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t)] \tag{13}$$

in \underline{U} steckt φ_u

$$U(t) = \text{Re} [\underline{U}e^{j\omega t}] = \hat{U} \cos(\omega t + \varphi_u) \tag{14}$$

analog:

$$\underline{I}e^{j\omega t} = \underline{I} [\cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t)] \tag{15}$$

6.1 Impedanz

$$Z = \frac{\underline{U}e^{j\omega t}}{\underline{I}e^{j\omega t}} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}}e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}}e^{j\varphi} \quad (16)$$

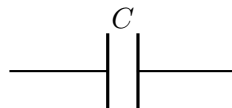
6.1.1 Widerstand

Da der ohmsche Widerstand nicht i.A. nicht frequenzabhängig ist, gilt: $Z = R$

Praktikum Termin 3: Tiefpassfilter

Messfehler durch Messgeräte und Kabel; Frequenzgang, Phasenverschiebung, Zeitkonstante, X-Y-Modus

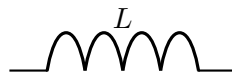
6.1.2 Kondensator



$$\begin{aligned} U &= \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt \\ \underline{U}e^{j\omega t} &= \frac{1}{C} \int \underline{I}e^{j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega C} \underline{I}e^{j\omega t} \\ \Rightarrow Z_C &= \frac{1}{j\omega C} \end{aligned} \quad (17)$$

Spannung eilt dem Strom nach

6.1.3 Spule



$$\begin{aligned} U &= L \frac{dI}{dt} \Rightarrow \underline{U}e^{j\omega t} = L \frac{d}{dt} (\underline{I}e^{j\omega t}) = j\omega L \underline{I}e^{j\omega t} \\ \Rightarrow Z_L &= j\omega L \end{aligned} \quad (18)$$

Strom eilt der Spannung nach

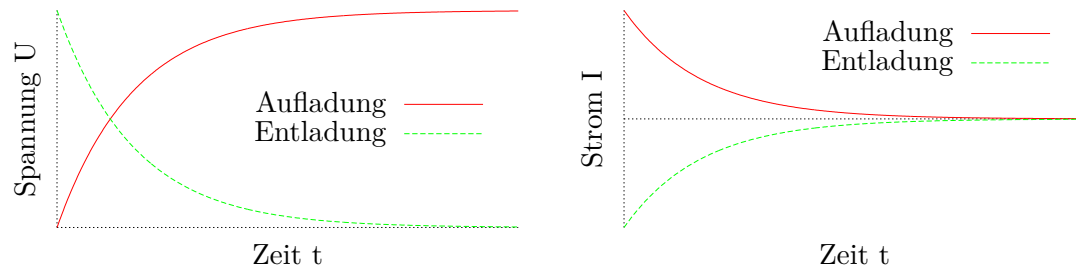


Abbildung 11: Auf- und Entladevorgang beim Kondensator, [gnuplot]

6.2 Logarithmisches Spannungsverhältnis

dB = Dezibel

$|\underline{A}|^\# =$ Verstärkungs-/Dämpfungsfaktor

$$|\underline{A}|^\# = 20dB \cdot \log_{10} \frac{\hat{U}_a}{\hat{U}_e} = 20dB \cdot \log_{10} |\underline{A}| \tag{19}$$



Oktave 1:2

Dekade 1:10

früher: Np = Neper (beruht auf dem natürlichen Logarithmus)

3 ~ 10dB

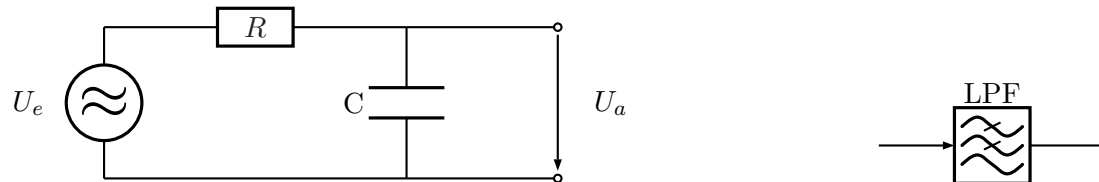
4 ~ 12dB

lineares Spannungsverhalten	log. Spannungsverhalten
$\frac{1}{2}$	-6dB
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	-3dB
1	0dB
$\sqrt{2}$	3dB
2	6dB
10	20dB
100	40dB
1000	60dB

6.3 Einfache R-C Glieder

6.3.1 Tiefpass

Schaltung:



Vorkommen: AD-DA-Wandler, Glättung bei Stromversorgung, DSL-Splitter (Frequenzweiche)

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + (\omega CR)^2} - j \frac{\omega CR}{1 + (\omega CR)^2} \quad (20)$$

mit $\underline{A} = |\underline{A}| e^{j\varphi} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega CR)^2}} \cdot e^{-j \cdot \arctan(\omega CR)}$

$$|\underline{A}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (21)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\text{Im}\{\underline{A}\}}{\text{Re}\{\underline{A}\}} = \arctan \frac{-\frac{\omega CR}{1+(\omega CR)^2}}{\frac{1}{1+(\omega CR)^2}} = \arctan(-\omega CR) = -\arctan(\omega CR)$$

$$\left(\varphi = -\arctan \frac{\text{Im}\{\frac{1}{\underline{A}}\}}{\text{Re}\{\frac{1}{\underline{A}}\}} = -\arctan \frac{\omega CR}{1} = -\arctan(\omega CR) \right)$$

$$\varphi = -\arctan(\omega CR) \quad (22)$$

3-dB Grenzfrequenz

$$|\underline{A}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_g^2 R^2 C^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \approx -3dB \right) \quad (23)$$

$$f_g = \frac{\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (24)$$

$$RC = \tau \quad (25)$$

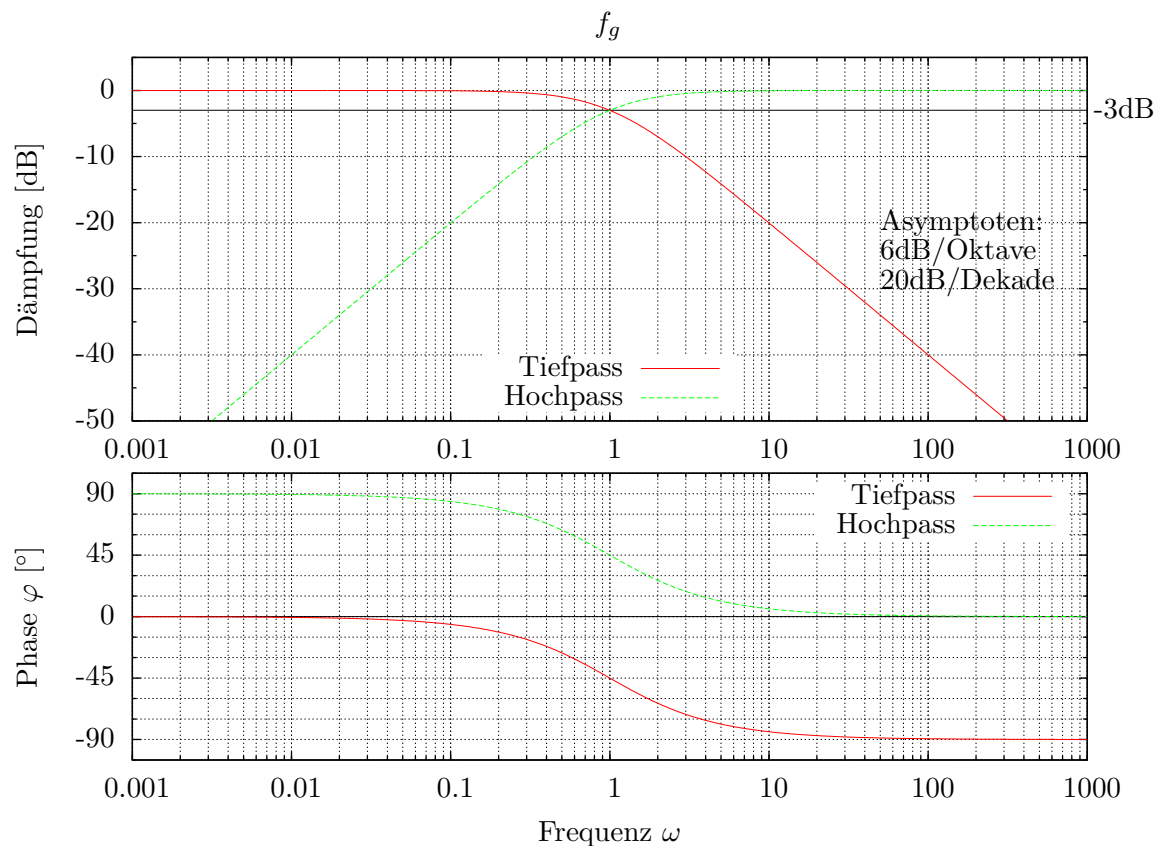


Abbildung 12: Bode-Diagramm, [gnuplot]

Zeitbereich Knotenregel für den Ausgang

$$\frac{(U_e - U_a)}{R} - I_C = 0 \quad (26)$$

mit $I_C = C \cdot \frac{dU_a}{dt}$

$$RC \frac{dU_a}{dt} + U_a = U_e [= U_{end}] \quad (27)$$

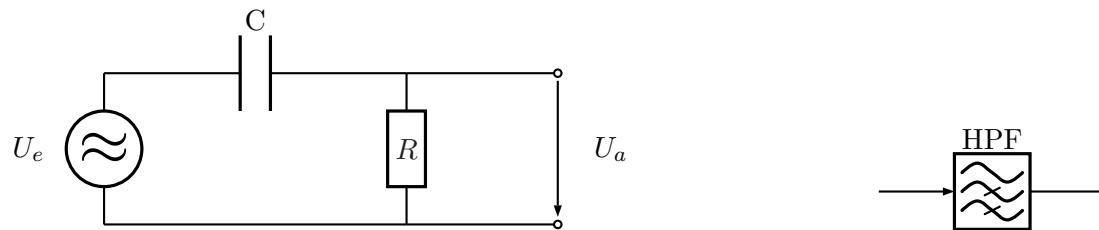
$$U_a(t) = U_{end}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (28)$$

oder $U_a(t) = U_{anf} e^{-\frac{t}{RC}}$

Zeitkonstante: Zeit bis Abweichung vom Endwert $\frac{1}{e}$ der Spannungshöhe ist $\tau = RC$

6.3.2 Hochpass

Schaltung:



Vorkommen: Audio-Schaltung, LAN (Transformatoren), SATA

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega CR}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}} + j \frac{\frac{1}{\omega CR}}{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}} \quad (29)$$

mit $\underline{A} = |\underline{A}| e^{j\varphi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}}} \cdot e^{j \cdot \arctan(\frac{1}{\omega CR})}$

$$|\underline{A}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 R^2 C^2}}} \quad (30)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\text{Im}\{\underline{A}\}}{\text{Re}\{\underline{A}\}} = \arctan \frac{\frac{\frac{1}{\omega CR}}{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}}}{\frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}}} = \arctan \frac{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}}{\omega CR \left(1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}\right)} = \arctan \frac{1}{\omega CR}$$

$$\left(\varphi = - \arctan \frac{\text{Im}\{\frac{1}{\underline{A}}\}}{\text{Re}\{\frac{1}{\underline{A}}\}} = - \arctan \frac{-\frac{1}{\omega CR}}{1} = \arctan \frac{1}{\omega CR} \right)$$

$$\varphi = \arctan \frac{1}{\omega CR} \quad (31)$$

Zeitbereich Knotenregel für den Ausgang

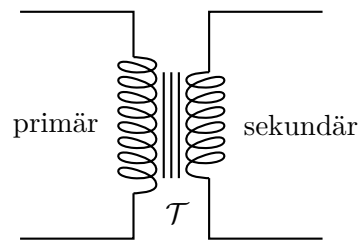
$$C \cdot \frac{d}{dt}(U_e - U_a) - \frac{U_a}{R} = 0 \quad (32)$$

$$\Rightarrow U_a(t) = U_{a0} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (33)$$

Praktikum Termin 4: einfache Netzwerke

Frequenzweiche, Bandpass (Bandsperre), Verlustleistung, Umgang mit Nichtlinearitäten

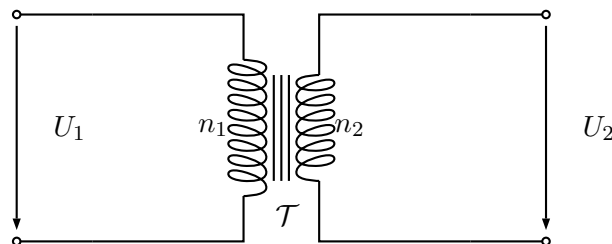
6.4 Transformatoren



Transformator: 2 oder mehr über ein Magnetfeld gekoppelte Spulen.
 Rahmen: Blechstapel (mehrere Lagen Blech, untereinander isoliert) \Rightarrow keine Wirbelströme

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \quad (34)$$

$$\underline{I}e^{j\omega t} = \frac{1}{L} \int \underline{U}e^{j\omega t} dt \quad (35)$$



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \ddot{U} \quad (\ddot{U}: \text{Übertragungsverhältnis}) \quad (36)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{\ddot{U}} \quad (37)$$

$$(38)$$

Leistung:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = P_2 = U_2 \cdot I_2 \quad (39)$$

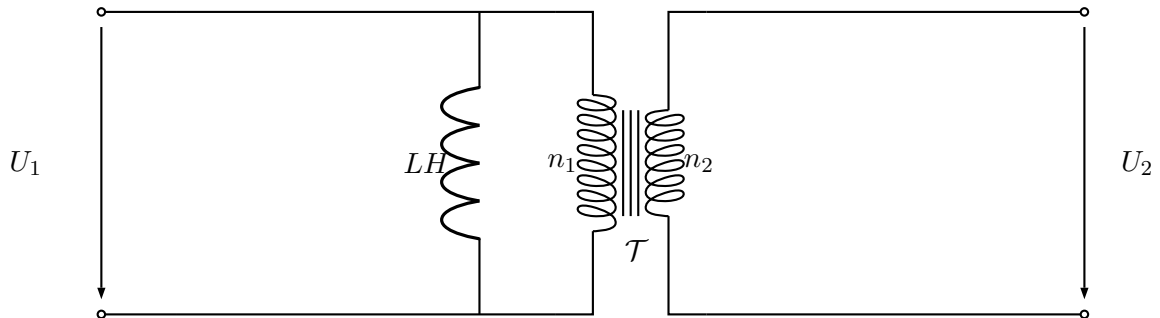
Blindstrom durch Hauptinduktivität:

$$I_B = \frac{U}{X} = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi f L} \quad (40)$$

Der Grund warum man Transformatoren einsetzt: Leistungsübertragung bei unterschiedlichen Strömen oder Spannungen

Ringkerntransformator: geringe Streuverluste

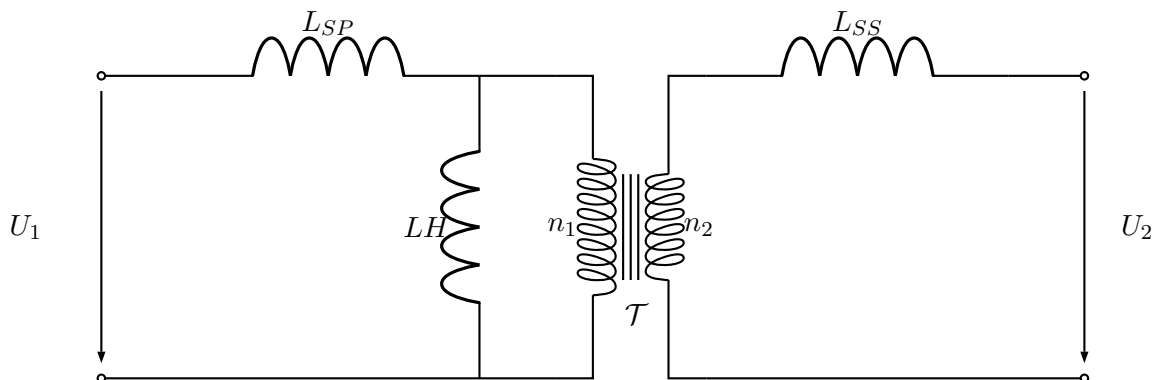
Hauptinduktivität



$$Z = j \underbrace{2\pi f}_{\omega} L \quad \text{bei kleinen Frequenzen} \quad (41)$$

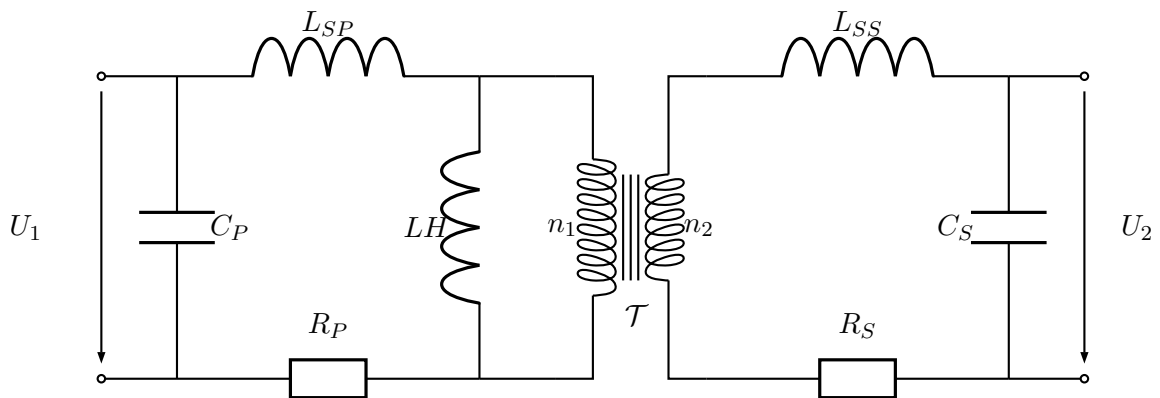
Effekt: Magnetisierung des Kernmaterials

Streuinduktivität



Luftspalt: hohe Streuinduktivität (Schweißtransformator, Spielzeug-Transformator), quasi Strombegrenzer

Wicklungswiderstände



Verluste in R_P , $R_S \Rightarrow$ Kupferverluste

Verluste im Kern \Rightarrow Eisenverluste

Sättigung des Kernmaterials Permeabilität des Kerns ist abhängig von der magnetischen Feldstärke und damit vom Strom

Einschaltverhalten:

F: Wann schaltet man Transformator am besten ein?

A: Bei Spannungsspitze, weil Strom 0 (folgt mit 90° Phasenverschiebung).

Bei Ringkerntransformatoren kann es oft vorkommen, dass eine Sicherung fliegt.

Einschalten bei Spannungs-Nulldurchgang: Strom steigt an, Gleichanteil, Nullsymmetrierung durch R_P und L_{SP}

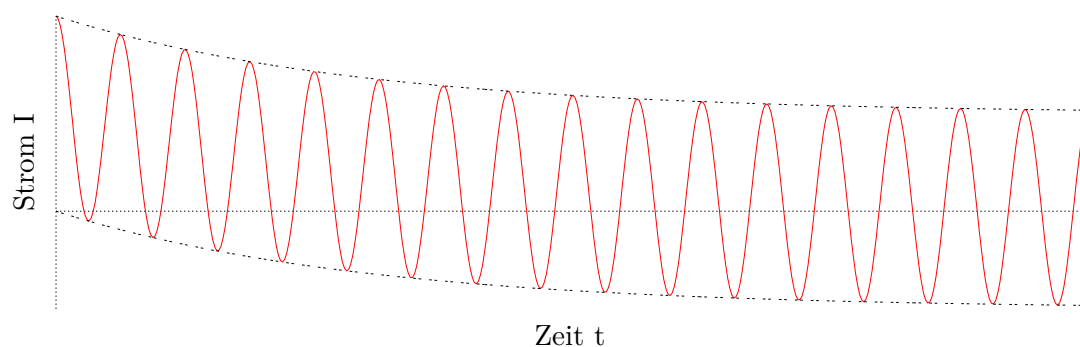


Abbildung 13: Offset durch Einschaltstrom

langsamer Rückgang zu Schwingung um 0 durch Kupferverluste, [gnuplot]

6.5 Trafo Sättigung

B Flussdichte

H Magn. Feldstärke

$H \sim I$

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu_r A}{2\pi r}$$

[hier fehlt wohl noch was]

7 Halbleiter

[hier fehlt auch noch was]

Leitungsband -> Elektronen frei

Valenzband -> Elektronen an Atom gebunden

Basiswerkstoffe IV. Gruppe

- Silizium (Si)
- Germanium (Ge)
- Gallium-Arsenid (GaAs)
- Indium-Phosphid (InP)

7.1 Bändermodell

Nichtleiter -> große Bandlücke

Leiter -> kleine Bandlücke

Halbleiter -> Bandlücke 1eV ... 3eV

7.2 Dotierung

Veränderung der Leitfähigkeit durch Fremdatome (Gruppe III oder V)

Donator: ein zusätzliches freies Elektron

Beispiele:

- Phosphor (P)
- Arsen (As)
- Antimon (Sb)

Akzeptor: ein Elektron fehlt

Beispiele:

- Aluminium (Al)
- Gallium (Ga)
- Indium (In)
- Bor (B)

Stromfluss

n-dotiert (Donator eingebaut) *Bild fehlt:* Elektronenstrom

p-dotiert (Akzeptor eingebaut) *Bild fehlt:* Löcherleitung

7.3 Gitter- und Bändermodell

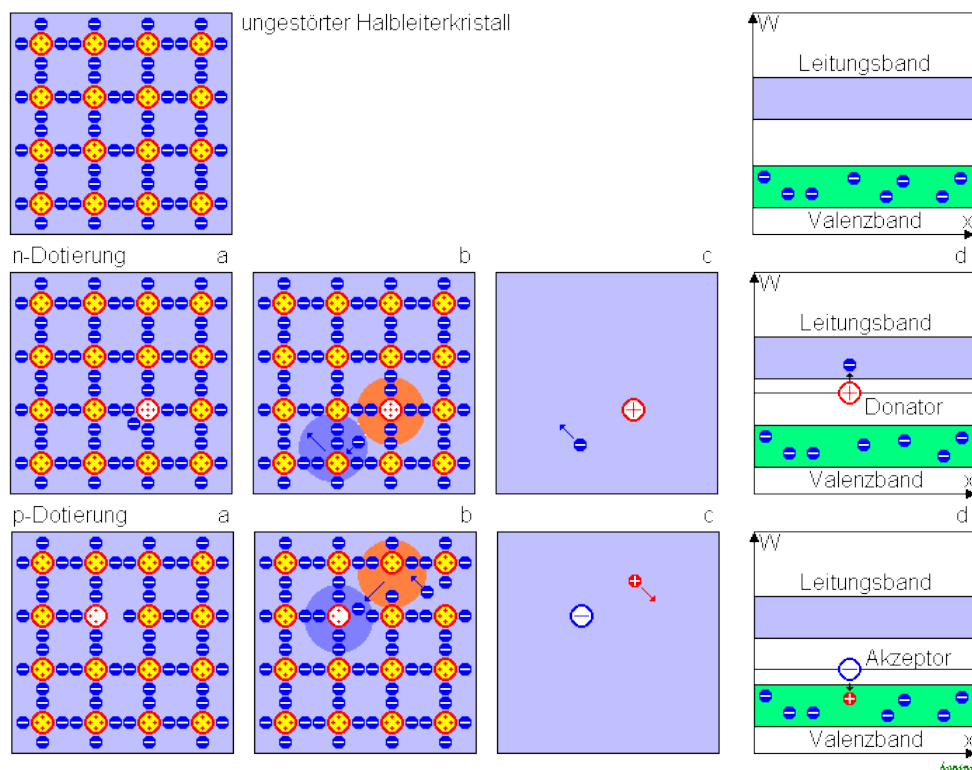


Abbildung 14: Quelle: Wikipedia (Honina)

7.4 pn-Übergang

Abbildung 15: p-n Übergang, Diffusionsspannung, Quelle: *Bild fehlt*

$$\text{Diffusionsspannung} \begin{cases} Si & 0,6..0,7V \\ Ge & 0,3V \end{cases}$$

7.4.1 pn-Übergang mit äußerer Spannung

Sperrrichtung Raumladungszone vergrößert, "kein" Stromfluss

Durchlassrichtung Diffusionsspannung wird überwunden, Ladungsträger werden frei (beweglich)

7.5 Diode



7.5.1 Metall-Halbleiter-Diode

Raumladungszone im Halbleiter: Diffusionsspannung ist kleiner 0,3 ... 0,5V

Leitung beruht auf Majoritätsträgern (Elektronen)

Schottky-Dioden schalten sehr schnell



Praktikum Termin 5: Halbleiter

Kennlinien Diode, LED, Transistor, PNP- und NPN-Transistor

7.6 Gleichrichter

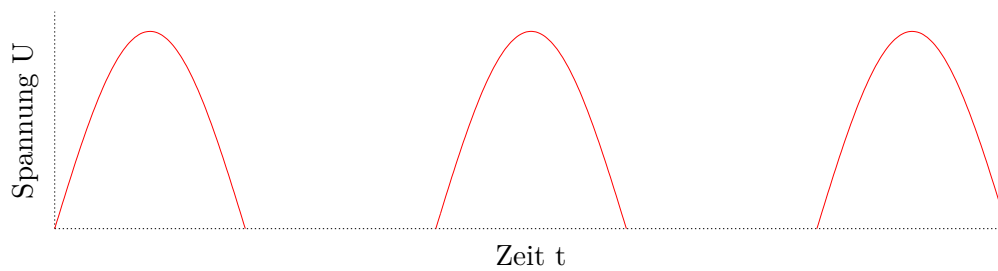
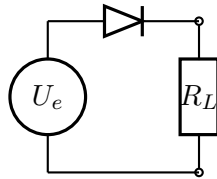


Abbildung 16: Diodengleichrichter (E1): Sinusspannung mit gekapptem negativen Teil, [gnuplot]

7.7 Brückengleichrichter (Graetzschaltung)

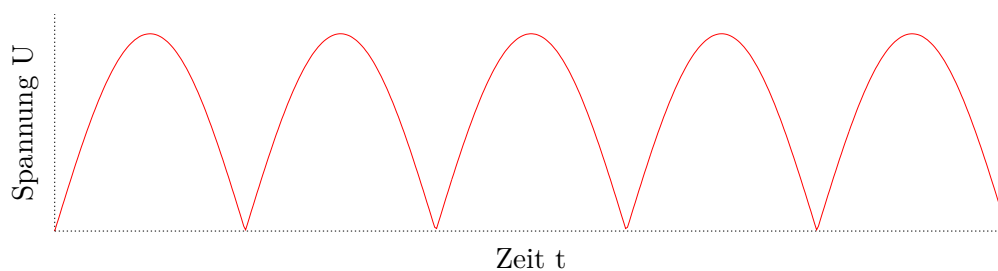
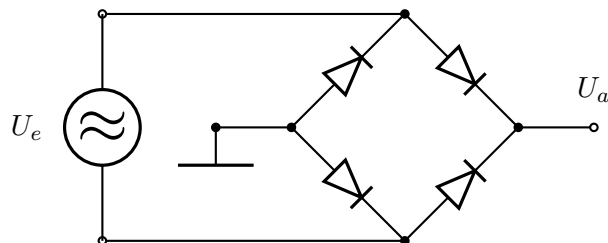
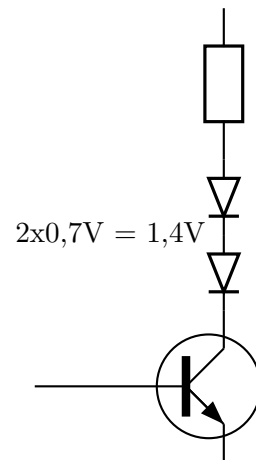
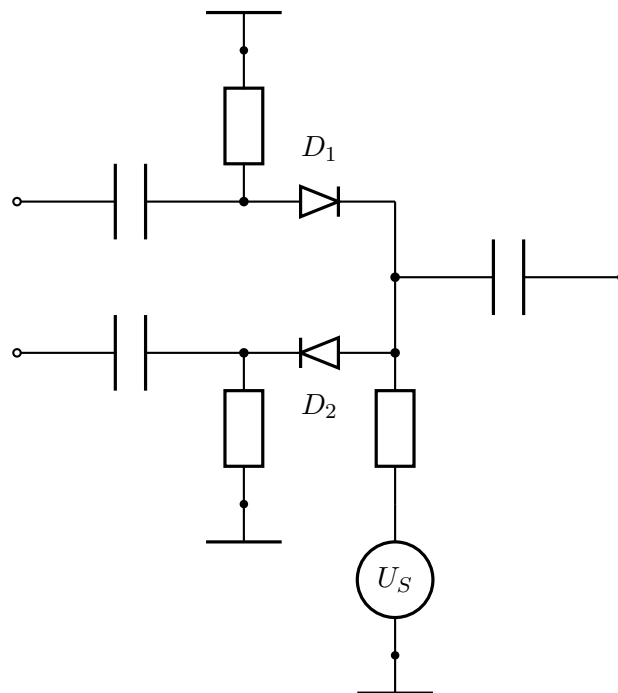


Abbildung 17: Brückengleichrichter (B2): Sinusspannung mit hochgeklapptem negativen Teil, [gnuplot]

7.8 Einsatz als Spannungsquelle



7.9 Einsatz als Schalter



$U_s(-)$: D_1 leitet, D_2 sperrt

$U_s(+)$: D_1 sperrt, D_2 leitet

7.10 Z-Dioden (Zener-Dioden)



Betrieb in Sperrichtung

Abbildung 18: Sperrbereich, Durchlassbereich, Quelle: *Bild fehlt*

Anwendung: Spannungsstabilisierung

7.11 Kapazitätsdiode

- in Sperrichtung betrieben
- Sperrschichtbreite abhängig von der Spannung
- Sperrschichtbreite bestimmt Kapazität
- im pF - Bereich, Verhältnis 1:5 bis 1:8

$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ Schwingkreis, Oszillator

7.12 Leuchtdiode, LED (=Light Emitting Diode)

Bandabstand durch Material und Dotierung so eingestellt, dass bei Rekombination Licht emittiert wird

Durchflußspannungen: 1,6V ... 4,4V
rot ... violett, UV

weiß: RGB-Diode oder blau/UV mit Phosphor

7.13 Fotodioden

Betrieb in Sperrichtung - Sperrstrom proportional zur (einfallenden) Lichtintensität

7.14 Bipolartransistoren

Stromgesteuerte Stromquelle

Sättigungsbetrieb: Basis überflutet

ab $U_{BE} > 0,7V$ -> Basisstrom

Kollektorstrom $I_C \cong \beta \cdot I_B$ β = Stromverstärkung

$U_{CE} < U_{BE}$ Sättigung, Basisstrom größer als nötig für den fließenden Kollektorstrom

Darlingtonschaltung, Stromverstärkungen multiplizieren sich $\beta \sim 10000$

Praktikum Termin 6: Transistorschaltungen

Kollektorschaltung (Emitterfolger), Transistor als Konstantspannungsquelle, als Konstantstromquelle, FET Konstantstromquelle

7.14.1 Kennlinie npn-Transistor

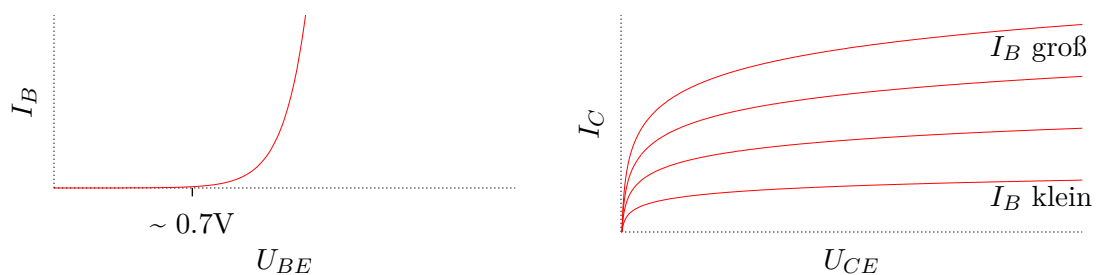
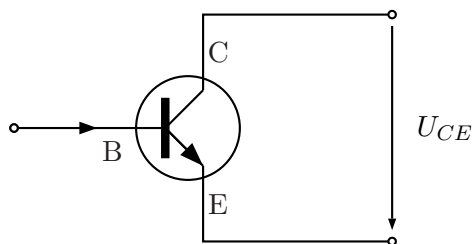


Abbildung 19: npn-Transistor Kennlinie nur schematisch, [gnuplot]



7.14.2 Kennlinie FET (Feldeffekttransistor)

siehe Handout

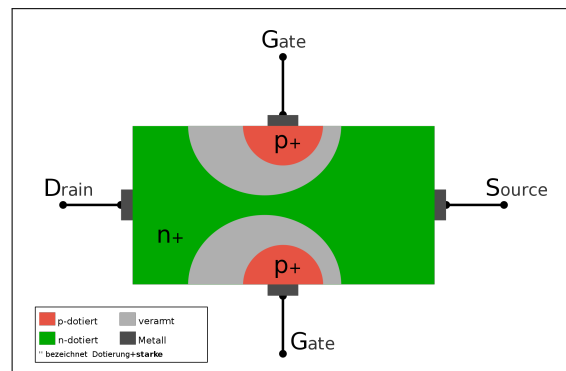


Abbildung 20: n-Kanal JFET, Quelle: Wikipedia (Arne Nordmann)

“Spannungsgesteuerter Widerstand”

Gatespannung: Gate negativer als Source -> Raumladungszone größer -> Kanal kleiner
 Kanal zu, wenn Spannung groß genug

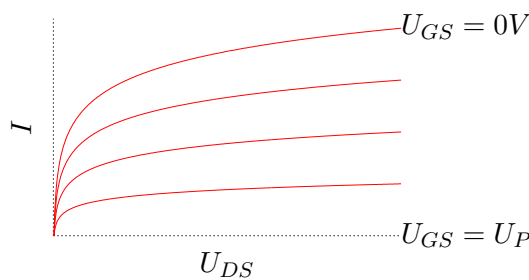


Abbildung 21: Kennlinie (Source und Drain verbunden), [gnuplot]

U_P : pinch-off / Abschnürspannung

7.15 MOS-FET (Metalloxid-semiconductor FET)

Schema fehlt. Gate ist vom Kanal isoliert.

Sperrschicht FET	MOS-FET	
j-FET	Verarmungs- Depletion-MOSFET	Anreicherungs- Enhancement-MOSFET
Kennlinie 1	Kennlinie wie j-FET	Kennlinie 2

siehe Handout

$R_{DS_{on}}$: Milliohm $m\Omega$

7.16 Transistor-Grundsaltungen

siehe Handout

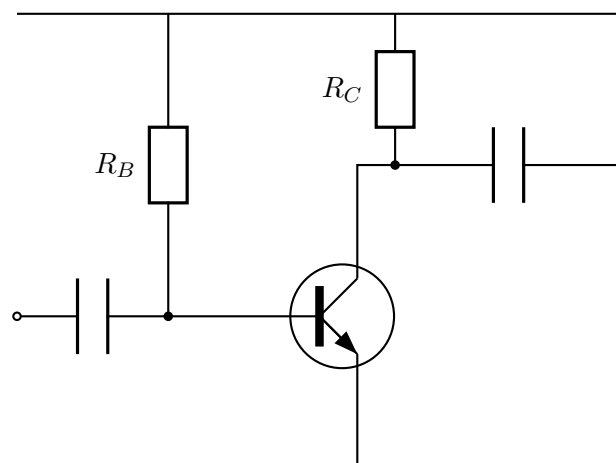
7.16.1 Emitterschaltung

R_B (Basiswiderstand): bei Steuerspannung "ein" kann der Laststrom sicher fließen

$\beta I_B > I_C$ Sättigung (I_B sehr groß):

- geringe Verlustleistung
- aber langsames Ausschalten

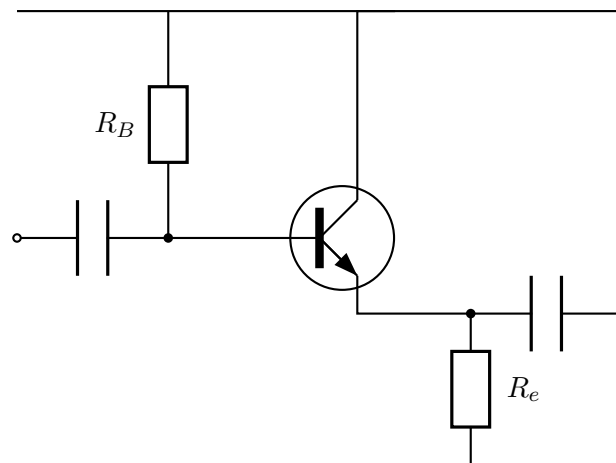
7.16.2 Linearverstärker



(diesen Aufbau findet man eher selten)

R_B -> kleiner Basisstrom

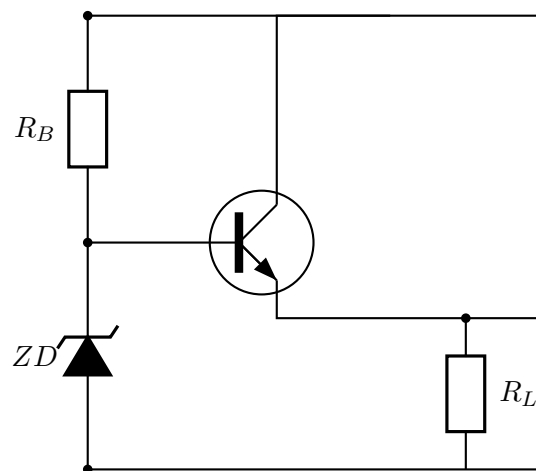
Steilheit: $S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}}$



- nicht invertiert
- nicht verstärkt $A \approx 1$
- Impedanztransformation
- großer Ausgangsstrom

7.16.3 Kollektorschaltung

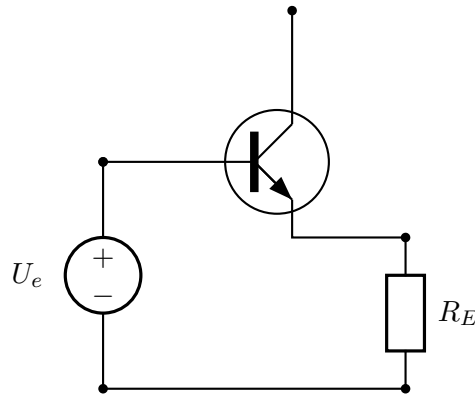
auch Emitterfolger. Emitter folgt Basis.



Spannungsregler für große Ströme

$$U_L = U_{ZD} - \underbrace{U_{BE}}_{0,7V}$$

7.16.4 Stromquelle



Mischung aus Emitter- und Kollektorschaltung

$$I_C \sim \frac{U_e - U_{BE}}{R_E}$$

Praktikum Termin 7: Wechselspannungsverstärker

Dimensionierung eines Wechselspannungsverstärkers, Verbesserte Schaltung: Stromgegenkopplung

7.17 Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

Schaltbild aus Praktikum

$$\text{Verstärkung } A = -\frac{R_1}{R_2}$$

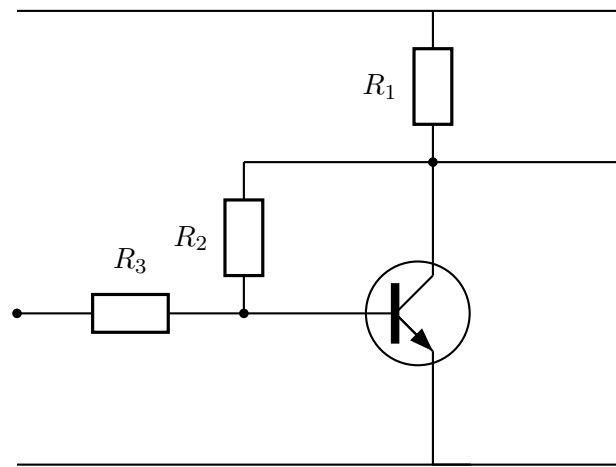
$$r_e = r_{BE} + \underbrace{\beta R_2}_{\text{dominant}}$$

$R = R_1$ Kollektor ist Stromquelle

Kondensator zwischen Versorgungsspannung: Bypass capacitor

Kondensator in Reihe: blocking capacitor

7.18 Spannungsgegenkopplung



$$A \sim \frac{R_2}{R_3}$$
$$r_e \sim R_3$$
$$r_a \sim \frac{1}{S} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

$$\text{Steilheit: } S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}}$$

8 Operationsverstärker

OPA, OpAmp, Operational Amplifier

Symbol, Grundschtaltung Operationsverstärker

$$U_D = U_p - U_n$$

$$U_A = U_D \cdot A = (U_p - U_n) \cdot A$$

hier fehlt noch was ...

- Differenzverstärker
- Verstärkung A sehr groß " ∞ ", reel > 10000
- "kein" Eingangsstrom, "keine" Offsetspannung
- Ausgangsimpedanz "0" Ohm, Spannungsquelle

Gegenkopplung vom Ausgang zum Eingang, aktiver Betrieb, Eingänge+Ausgang im erlaubten Bereich: Eingangsdifferenz U_D wird zu 0 geregelt

Eingangsspannungsbereich:

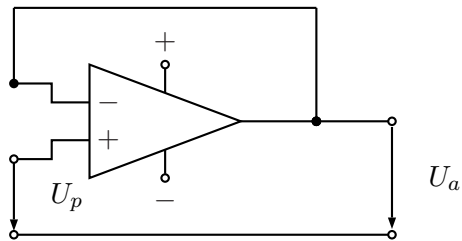
- kleiner als Grenzen der Versorgungsspannungen
- maximale Eingangsdifferenz

Gleichtaktunterdrückung Ausgangsspannungsbereich - innerhalb der Versorgungsspannungen

Bode-Diagramm (Gain-Bandwidth Produkt Verstärkungsbandbreite) *fehlt auch noch*

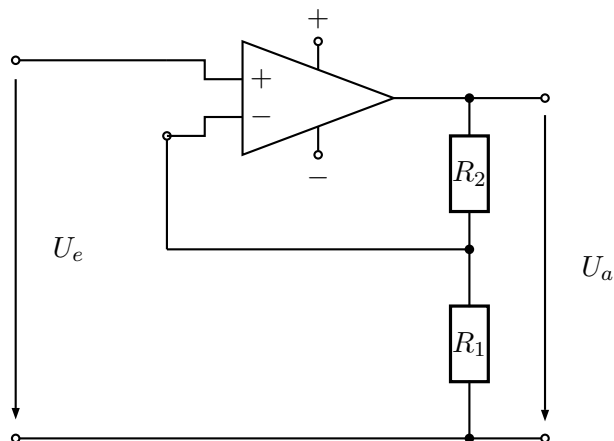
8.1 Grundsaltungen

8.1.1 Spannungsfolger



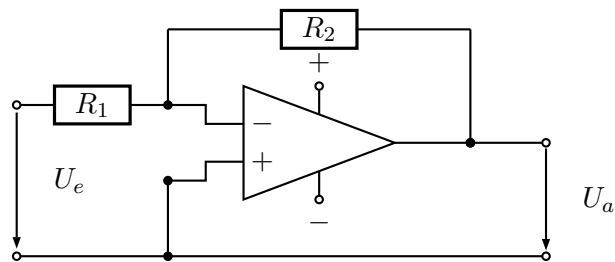
$$A = 1$$
$$R_e \sim \infty$$
$$R_a \sim 0$$

8.1.2 nicht-invertierende Verstärker



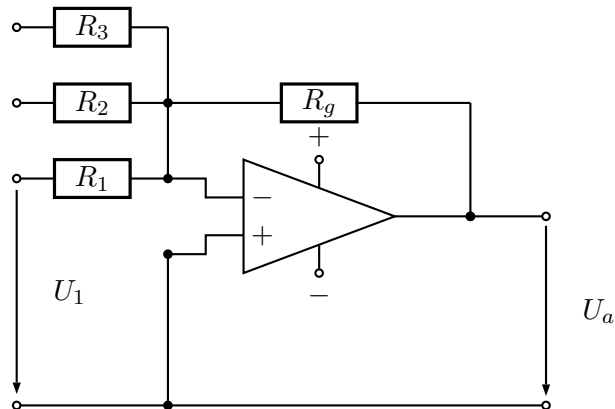
$$A = \frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

8.1.3 invertierende Verstärker

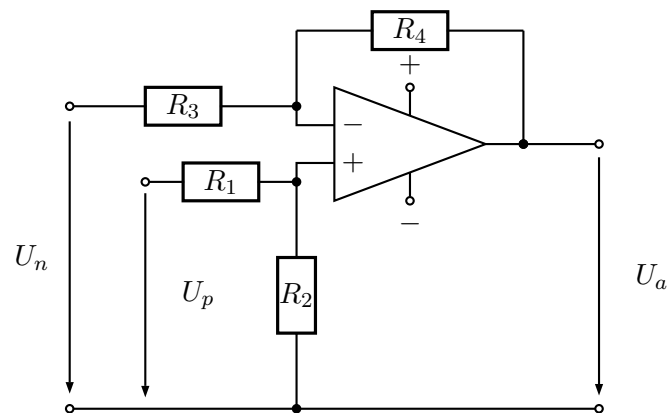


$$A = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

8.1.4 Summenverstärker



$$U_a = -U_1 \frac{R_g}{R_1} - U_2 \frac{R_g}{R_2} - U_3 \frac{R_g}{R_3}$$

8.1.5 Subtrahierer / Differenzverstärker

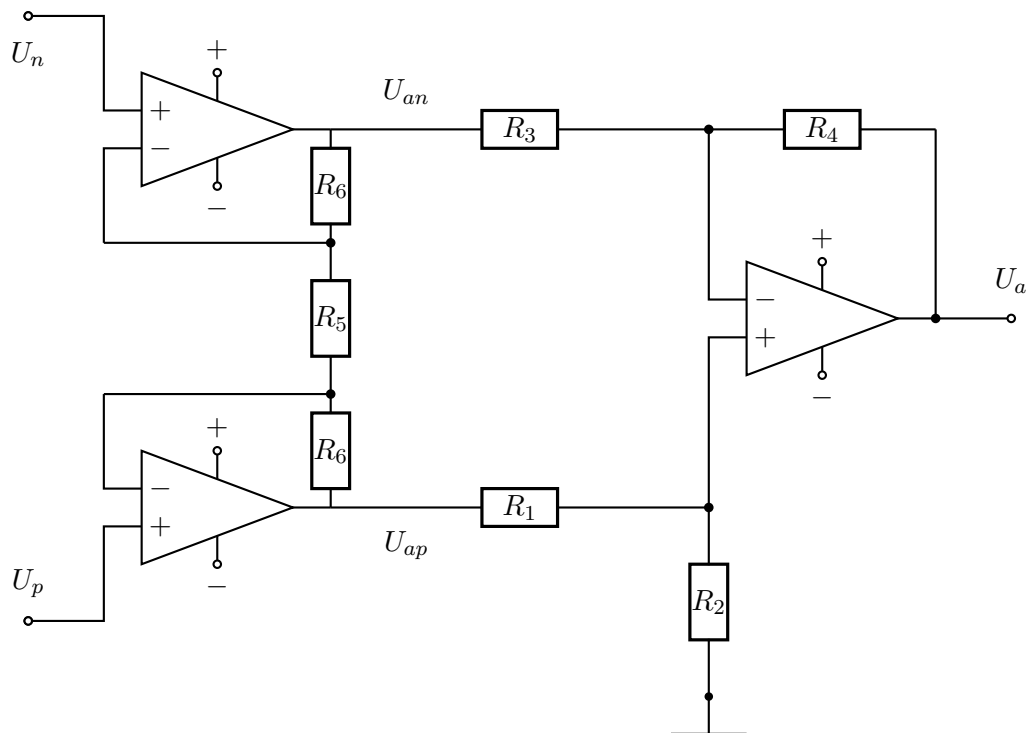
$$U_a = \frac{R_2}{R_1+R_2}U_p \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) - \frac{R_4}{R_3}U_n$$

alle Widerstände gleich: $U_a = U_p - U_n$

Praktikum Termin 8: Operationsverstärker

invertierender, nicht-invertierender Verstärker, Differenzverstärker, Oszillator

8.1.6 Elektrometerverstärker (Instrumentation Amplifier, nicht-invertierend)



Gleichtaktverstärkung

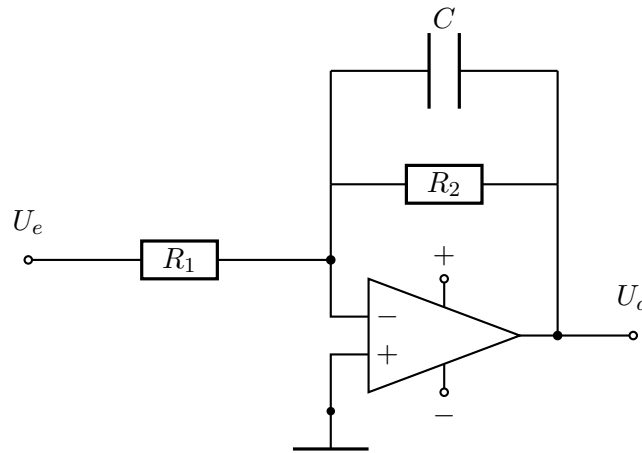
- 1. Stufe $A_1 = 1$
- 2. Stufe ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$)
 $A_2 = U_{ap} - U_{an}$

Gegentaktverstärkung

pro Seite $A_1 = 1 + \frac{R_6}{\frac{R_5}{2}} = \frac{U_{an}}{U_n}$

8.2 Filter

Tiefpass (invertierend)

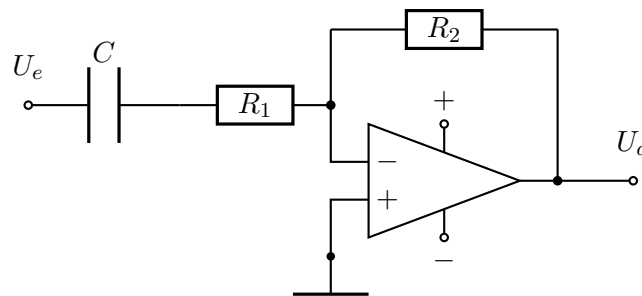


$$A(f) = -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + (2\pi f R_2 C)}$$

$$\tau = R_2 C$$

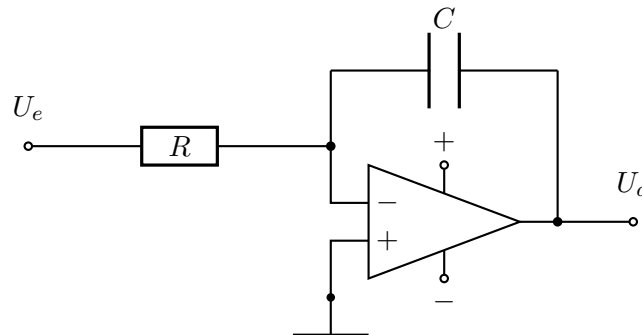
R_1 bestimmt frequenzunabhängig die Verstärkung

Hochpass



$$A(f) = -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{2\pi f R_1 C}}$$

8.3 Integrierer (invertierend)



$$U_a = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_e(t) dt + U_a(0)$$

$$A = \frac{1}{j\omega RC}$$

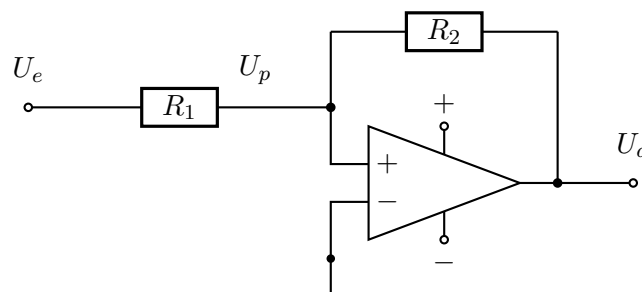
Bode-Diagramm *fehlt*

Phase immer -90°

8.4 Komparator

- sehr hohe Verstärkung
- keine Gegenkopplung
- Ausgang ist am positiven Anschlag, wenn $U_p > U_n$
- Ausgang ist am negativen Anschlag, wenn $U_p < U_n$

8.5 Mitkopplung



UTH Threshold, Hyterese *fehlt*

Überlagerungssatz Kippzeitpunkt

$$U_p = U_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_a \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

9 Digitaltechnik

Schema Schaltschwelle Komparator fehlt

9.1 TTL (Transistor-Transistor-Logik)

Schaltung TTL, 4-fach NAND fehlt

Versorgungsspannung 5V (3,3V Low-Volt-TTL, 2,5V)
Schaltschwelle $\sim 1,5V$ (unabhängig)

9.2 CMOS (complementary MOS-FET Logic)

Schaltung CMOS Inverter fehlt

Eingang "1" -> oberer FET leitet
unterer FET leitet

- kein statischer Stromverbrauch
- Stromverbrauch steigt mit der Frequenz (Kapazitätsumladung)
- Schaltschwelle = halbe Versorgungsspannung

Praktikum Termin 9: Digitaltechnik

Oszillator mit NE555, monostabiler Multivibrator, astabiler Multivibrator

9.3 Tri-State Ausgang

Schaltung fehlt

"0" low Pegel
"1" high Pegel
"Z" hochohmiger Zustand

9.4 Open Collector

Schaltung fehlt

I^2C Bus, braucht nur 2 Leitungen für Kommunikation in 2 Richtungen

Technologien für hohe Geschwindigkeiten:

- ECL = Emitter Coupled Logic
- CML = Current Mode Logic

Gemeinsamkeiten: beide haben

- Differenzverstärker als Eingang
- differenzielle Logik
- können Impedanzkontrollierte Leitungen treiben

Ausgang ECL CML (*Schaltungen fehlen*)

Übertragungsstandard (Eingang Ausgang)

LVDS (Low Voltage Digital Signal)

Anwendung: HDMI, DVI, Display Port (kann man mit Adaptern ineinander überführen)

9.5 Logische Verknüpfungen

A UND B

siehe Handout

9.6 Flip-Flop

Bistabile Kippstufe (*Schaltung mit Transistoren und mit Logikgattern fehlt*)

9.6.1 D-Flip-Flop

bei jeder positiven Flanke von CLK wird D übernommen und an Q ausgegeben

Setup-Zeit (vor positiver Flanke)

Holdzeit (nach positiver Flanke)

In der Zeit (Setup+Hold) muss D stabil sein
CLK-out Zeit: nach dieser Zeit existiert D-Signal an Q

Praktikum Termin 10: Flip-Flop
Oszillator mit NE555, FlipFlop, Decoder

9.7 Schieberegister

Schieberegister aus D-Flip-Flops

Praktikum Termin 11: Bastelprojekt
Bastelprojekt für das Elektronik-Praktikum: Kleinverstärker (Löten)

Praktikum Termin 12: "Termin 11" Logik
Flip-Flop aus Logikbausteinen, Schieberegister aus Flip-Flops, Audio Vorverstärker

Viel Erfolg bei der Klausur!